Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 21, No. 2, Summer 2023, p. 159-171

Evaluating the Sustainability of Canola Agroecosystems Using Energy Analysis, Carbon Footprint, and Greenhouse Gases

H. R. Shahhoseini[1], S. Lotfi[2], H. Kazemi[3*], B. Kamkar[4]

Received: 29-04-2022 Revised: 10-10-2022 Accepted: 19-11-2022	**How to cite this article:** Shahhoseini, H. R., Lotfi, S., Kazemi, H., & Kamkar, B. (2023). Evaluating the Sustainability of Canola Agroecosystems Using Energy Analysis, Carbon Footprint, and Greenhouse Gases. *Iranian Journal of Field Crops Research, 21*(2), 159-171. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76465.1168

Introduction

In recent decades, the need for increased food production has resulted in the expansion of intensified agriculture practices characterized by high consumption of inputs, thereby reducing agricultural sustainability. The agricultural sector's contribution to the world's energy consumption, ecological footprint, and greenhouse gas emissions has grown substantially. Emissions of greenhouse gases have negative ecological effects, including climate change, global warming, and diminished sustainable development. In this sector, energy analysis and greenhouse gas emissions in ecosystems are the most common methods for assessing sustainability. This study was conducted to evaluate the sustainability of canola agroecosystems by analyzing energy consumption, carbon footprint, and greenhouse gas emissions.

Methods and Materials

The study was conducted using a questionnaire in Kalaleh County, in Golestan province, and gathering information from Golestan Agricultural Jihad Organization, during 2018-2019. The number of samples was determined by the Cochran formula. Accordingly, 50 farms were selected for canola cultivation. The questionnaire's reliability was determined to be 0.81. To calculate the energy indices, carbon footprint, and greenhouse gas emissions, after determining the most important inputs and output, first, their amounts were determined in each of the 50 farms and then their average was calculated. The energy equivalent of each input and output was calculated by multiplying its raw value by the corresponding energy conversion factor. The carbon footprint of the canola system was calculated as the amount of land required to absorb the environmental pollution caused by input and resource consumption. Carbon uptake in canola agroecosystems served as the basis for evaluating the carbon footprint and consequently the sustainability of this study. Also, the amount of greenhouse gases produced was determined by multiplying the raw values of the consumed inputs by their emission coefficient.

Results and Discussion

In canola agroecosystems, the total energy input was calculated to be 13,200 MJ ha^{-1}, the total energy output was 63,400 MJ ha^{-1}, the energy use efficiency was 4.8, and the energy productivity was 0.17 kg MJ^{-1}. In addition, the ecological footprint and global warming potential were 0.99 gha and 779.03 CO_2e ha^{-1}, respectively. In canola production, fossil fuel and nitrogen fertilizer inputs contributed the most to ecological footprint and global warming potential respectively. Reducing the number of machines entering the farm through the application of conservation tillage methods and the modernization of machines can be effective in reducing the

1- PhD graduated of Agroecology, Department of Agronomy, University of Zabol, Zabol, Iran
2- M.Sc. Graduated of Agrotechnology, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
3- Associated Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
4- Professor, Department of Agroecothenology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: hkazemi@gau.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76465.1168

consumption of this input. Due to the non-renewability of this input, reducing its consumption is effective in reducing both economic costs and environmental pollution. Consuming as much livestock manure (cattle) as possible and implementing crop rotations with legumes such as soybeans that can grow well in this area is effective in supplying soil nitrogen and reducing the need for chemical fertilizers.

Conclusion

Analysis of energy indices, such as energy efficiency and net energy, revealed that energy loss in the canola farming ecosystem is low and that the system's sustainability is adequate. Evaluation of carbon footprint revealed that the value of this index for canola production in the county of Kalaleh was less than the ecological capacity of each hectare of land used for canola production, indicating the environmental sustainability of canola production in the county of Kalaleh. In general, canola agroecosystems in the county of Kalaleh were sustainable based on terms of all three indices: net energy, carbon footprint, and global warming potential. Due to the large proportion of two inputs, fossil fuel, and nitrogen fertilizer, in these indices and their significant impact on production sustainability, consumption management of these inputs and training and justification of farmers are recommended to increase production sustainability.

Keywords: Carbon efficiency, Ecological capacity, Fossil fuel, Global warming potential, Nitrogen fertilizer

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۱، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۲، ص ۱۷۱-۱۵۹

ارزیابی پایداری کشت‌بوم‌های کلزا (*Brassica napus* L.) بر پایه تحلیل انرژی، ردپای کربن و گازهای گلخانه‌ای

حمیدرضا شاه حسینی[۱]، سمانه لطفی[۲]، حسین کاظمی[۳*]، بهنام کامکار[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

چکیده

این تحقیق با هدف ارزیابی پایداری کشت‌بوم‌های کلزا بر اساس تحلیل انرژی، ردپای کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای در شهرستان کلاله، در استان گلستان، در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ به‌وسیله پرسشنامه و مصاحبه چهره به چهره با کلزاکاران و جمع‌آوری اطلاعات از سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان انجام شد. تعداد مزارع مورد مطالعه، توسط رابطه کوکران تعیین گردید. بر این اساس، ۵۰ مزرعه کلزا انتخاب شدند. قابلیت اعتماد پرسشنامه ۰/۸۱ محاسبه شد. پس از تعیین مهم‌ترین ورودی‌ها و خروجی مزارع، ردپای کربن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص‌های مربوط به انرژی در این کشت‌بوم‌ها محاسبه و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که انرژی ورودی کل ۱۳۲۰۰ مگاژول در هکتار، انرژی خروجی کل ۶۳۴۰۰ مگاژول در هکتار، کارایی مصرف انرژی ۴/۸، بهره‌وری انرژی ۰/۱۷ کیلوگرم در مگاژول، ردپای بوم‌شناختی تولید کلزا ۰/۹۹ هکتار جهانی و پتانسیل گرمایش جهانی ۷۷۹/۰۳ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن در هکتار بود. همچنین، ورودی‌های سوخت فسیلی با ۴۶/۴۶ و ۵۴/۸۳ و کود نیتروژن با ۳۹/۲۴ و ۳۴/۷۳ درصد، به‌ترتیب بیشترین سهم از هر دو شاخص ردپای کربن و پتانسیل گرمایش جهانی در تولید کلزا را داشتند. به‌طور کلی تولید کلزا در شهرستان کلاله از لحاظ هر سه شاخص انرژی خالص، ردپای کربن و پتانسیل گرمایش جهانی، پایدار بود. با این وجود، به دلیل سهم زیاد دو ورودی سوخت فسیلی و کود نیتروژن از این شاخص‌ها و در نتیجه تاثیر زیاد آن‌ها روی پایداری تولید، مدیریت مصرف این ورودی‌ها و آموزش و توجیه کشاورزان در این زمینه، به‌منظور افزایش پایداری تولید محصول، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل گرمایش جهانی، سوخت فسیلی، ظرفیت بوم‌شناختی، کارایی کربن، کود نیتروژن

مقدمه

افزایش نیاز به تولید غذا طی دهه‌های اخیر، موجب گسترش رویکرد کشاورزی صنعتی و با مصرف زیاد نهاده‌ها شده است که پیامد این امر، کاهش پایداری در کشاورزی بوده است (Lombardi *et al.*, 2021). بنابراین، کشاورزی به‌عنوان یک سامانه تولید غذا، موجب افزایش سرعت تخریب محیط، تخلیه منابع و انتشار آلودگی‌ها در هر دو سطح محلی و جهانی شده است (Montoya, Gaba, de Mazancourt, Bretagnolle, & Loreau, 2020). سیاست‌های تولید غذا باید در جهت حل مسائل کمبود منابع طبیعی و آلودگی‌ها و پایداری سامانه‌های تولید- مصرف غذا باشد. به‌منظور اطمینان از قابلیت زیستی سامانه‌های تولید محصول پایدار، باید سودمندی کشاورزی، در کنار حفاظت از منابع و تولید سالم، در نظر گرفته شود (Lombardi *et al.*, 2021). سهم کشاورزی در مصرف انرژی، ردپای بوم‌شناختی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان، در سال‌های اخیر افزایش قابل‌توجهی داشته است. میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از بخش کشاورزی تا ۱۹/۹ گیگاتن معادل دی‌اکسید کربن در سال برآورد می‌شود (Prakash Meena *et al.*, 2021). تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن، اکسیدهای نیتروس و

۱- دانش‌آموخته دکتری اگرواکولوژی، گروه زراعت، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اگروتکنولوژی، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۳- دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴- استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hkazemi@gau.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.76465.1168

متان، اثرات نامطلوب بوم‌شناختی از جمله تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و کاهش توسعه پایدار را به دنبال دارد (Jamali, Soufizadeh, Yeganeh, & Emem, 2021). شواهد موجود نشان می‌دهد که تغییر جهانی اقلیم، متغیرهای اقلیمی کشاورزی ایران در چند دهه آینده را تحت تاثیر قرار خواهد داد (Koocheki & Nassiri Mahallati, 2016; Rezaei, Naderi Mahdei, Karimi, & Shanazi, 2019). همچنین، تغییرات در الگوی مصرف انرژی در این بخش، موجب افزایش ردپای بوم‌شناختی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این بخش شده است. بنابراین، نوآوری در مدیریت کشاورزی به‌منظور کاهش مصرف انرژی، ردپای بوم‌شناختی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ضروری است (Jamali *et al*., 2021).

بین کشاورزی و انرژی ارتباط تنگاتنگی وجود دارد؛ کشاورزی، از یک طرف، مصرف‌کننده انرژی و از طرف دیگر، تامین‌کننده انرژی به شکل زیستی می‌باشد (Elsoragaby, Yahya, Mahadi, Mat Nawi, & Mairghany, 2019). در وضعیت کنونی کشاورزی، سودمندی و بهره‌وری محصولات، به مصرف کارآمد انرژی در این بخش بستگی دارد (Kaur, Kumar Vashist, & Brar, 2021; Kumar *et al*., 2021). مصرف انرژی در بخش کشاورزی به دلیل افزایش مکانیزاسیون و کاربرد انرژی‌های تجاری، سریع‌تر از بخش‌های دیگر اقتصادی در جهان افزایش یافته است؛ با این وجود، افزایش مصرف ورودی‌ها به‌منظور کسب حداکثر عملکرد، ممکن است موجب کاهش پایداری شود؛ زیرا منابع محیطی در حال کاهش و آلودگی‌های محیطی در حال افزایش است. بنابراین، بهبود کارایی مصرف انرژی به دلیل کاهش اثرات نامطلوب محیطی، از جمله کاهش پایداری، ضروری است. مصرف کارآمد انرژی در کشاورزی، راهکار قابل دستیابی برای کاهش مصرف ورودی‌ها، کاهش ردپای بوم‌شناختی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش تخریب منابع محیطی و در نتیجه دستیابی به کشاورزی پایدار است (Mousavi-Avval, Rafiee, Jafari, & Mohammadi, 2011). ردپای بوم‌شناختی کشاورزی، شاخصی مناسب برای تعیین میزان مصرف منابع است که توسط تبدیل منابع و ورودی‌های مصرفی در مزرعه و ارائه آن‌ها بر حسب واحد هکتار جهانی، برآورد می‌گردد. بنابراین، معیار مناسبی برای تحلیل انرژی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی است. آن‌چه در ردپای بوم‌شناختی کشاورزی بیش از بقیه اهمیت دارد، انرژی مصرفی و تولیدی در آن است که موجب انتشار کربن و در نهایت تاثیر کشاورزی بر محیط می‌شود و به این طریق پایداری نظام‌های کشاورزی را ارزیابی می‌کند (Cerutti, Beccaro, Bagliani, Donno, & Bounous, 2013; Rezaei *et al*., 2019). کلزا با داشتن ترکیب مطلوبی از اسیدهای چرب (۵۶ تا ۶۸ درصد اسید اولئیک، ۱۸ تا ۲۲ درصد اسید لینولئیک و ۱۰ تا ۱۳ درصد اسید لینولنیک)، یکی از مناسب‌ترین محصولات برای تولید روغن با مصارف مختلف خوراکی و صنعتی می‌باشد (Jankowski, Budzynski, & Kijewski, 2015). تولید کلزا و زنجیره تامین آن به شدت به ورودی‌هایی مانند کود، ماشین‌آلات و سوخت فسیلی وابسته بوده و توسعه آن در ایران مشکلاتی در زمینه مصرف پایدار منابع انرژی و اثرات محیطی ایجاد کرده است. بنابراین ارزیابی پایداری تولید این محصول زراعی، بیش از پیش اهمیت دارد (Mousavi-Avval *et al*., 2011).

تحلیل انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در بوم‌نظام‌های زراعی، رویکرد کاربردی رایج در ارزیابی پایداری در این بخش است؛ از جمله می‌توان به مطالعات انجام شده روی گندم (*Triticum aestivum*) (Soltani, Rajabi, Zeinali, & Soltani, 2013)، یونجه (*Medicago sativa*) (Asgharipour, Mousavinik, & Fartout Enayat, 2016)، کلزا (*Brassica napus*) (Kazemi *et al*., 2016)، سویا (*Glycine max*) (Alimagham, Soltani, Zeinali, & Kazemi, 2017) و غلات (Hoffman *et al*., 2018) اشاره کرد. اما تلفیقی از ارزیابی‌های انرژی، ردپای بوم‌شناختی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، راهکار جامع‌تری در زمینه مصرف کارآمد نهاده‌ها، کاهش اثرات نامطلوب محیطی و دستیابی به پایداری خواهد بود (Prakash Meena *et al*., 2021). با این وجود، مطالعات بسیار کمی در زمینه ارزیابی پایداری تولید محصولات زراعی بر اساس تلفیق تحلیل انرژی، ردپای بوم‌شناختی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران و حتی جهان انجام شده است.

ارزیابی پایداری نظام‌های مختلف تولید گندم آبی در استان همدان به‌وسیله تحلیل ردپای بوم‌شناختی نشان داد، میزان این شاخص در نظام کشت مرسوم ۲/۹۶ و در نظام کشت حفاظتی ۲/۸۴ معادل هکتار جهانی بود و بر این اساس ۷۰ و ۳۰ درصد از مزارع به‌ترتیب در سطح با ناپایداری زیاد و ناپایداری کم قرار داشتند (Naderi Mahdei, Bahrami, Aazami, & Sheklabadi, 2015). ارزیابی انرژی و ردپای بوم‌شناختی نظام کشت نخودفرنگی-گندم بدون خاک‌ورزی در نظام‌های کشت خالص یا توام بر پایه مالچ بقایا و کوددهی، در مناطق نیمه‌خشک هندوستان نشان داد که شاخص‌های خروجی انرژی، انرژی ویژه و ردپای بوم‌شناختی در نظام کشت توام بیشتر از نظام کشت خالص بود اما در مورد شاخص‌های کارایی مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی، این مورد عکس بود (Kumar *et al*., 2021). مقدار تولید کلزا در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ حدود ۱۰۹۱۷۵ تن در استان گلستان گزارش شده است که ۳۱/۱ درصد از تولید کل کلزا در کشور را به خود اختصاص داده و رتبه نخست را از نظر تولید داراست. شهرستان کلاله در استان گلستان، یکی از قطب‌های تولید کلزا در کشور است. سطح زیر کشت این محصول در شهرستان کلاله در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ حدود ۱۷۹۵۲ هکتار بود (Jihad-e-Agricultural Organization of Golestan

(Province, 2019) هدف از این پژوهش، ارزیابی پایداری تولید کلزا در شهرستان کلاله، در استان گلستان و ارایه راهکارهایی برای مدیریت بهتر تولید به‌منظور کاهش مصرف انرژی، ردپای کربن، انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش پایداری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در شهرستان کلاله، واقع در استان گلستان، انجام شد. داده‌ها توسط پرسشنامه و مصاحبه چهره به چهره با کلزاکاران جمع‌آوری شد. تعداد مزارع مورد مطالعه توسط رابطه (۱) تعیین شد (Cochran, 2003).

$$n = \frac{\frac{z^2pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}\left(\frac{z^2pq}{d^2}-1\right)} \qquad (۱)$$

در این رابطه، n حجم نمونه، N حجم جامعه آماری، z خطای معیار ضریب اطمیان قابل‌قبول (۱/۹۶)، p نسبتی از جمعیت دارای صفتی معین (۰/۵)، q نسبتی از جمعیت فاقد صفتی معین (۰/۵) و d دقت احتمالی قابل قبول بود. بر این اساس تعداد پرسشنامه برای کلزاکاران ۵۰ در نظر گرفته شد. انتخاب کشاورزان با روش نمونه‌برداری تصادفی انجام شد.

تحلیل انرژی

برای محاسبه معادل انرژی ورودی‌ها و خروجی در کشت‌بوم‌های کلزا، ابتدا مهم‌ترین ورودی‌ها و خروجی در هر کدام از مزارع تعیین و سپس میانگین آن محاسبه شد. درخصوص ورودی کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها، مقدار موثر آن‌ها تعیین شد. معادل انرژی هر ورودی و نیز خروجی، با ضرب مقدار در ضریب تبدیل انرژی مربوطه (جدول ۱) محاسبه شد (Asgharipour *et al*., 2016). منابع کودی مورد استفاده در مزارع کلزا اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات آمونیوم بود.

جدول ۱- میانگین و معادل‌های انرژی ورودی‌ها و خروجی در بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله

Table 1- Average values and energy equivalents of inputs and output in canola farming ecosystem in Kalaleh county

متغیر Item	واحد Unit	میانگین Average	معادل‌انرژی Energy equivalents (MJ unit^{-1})	منابع References
نیروی کارگری Human labor	ساعت h	15.00	1.96	Ozkan, Fert, & Karadeniz, 2007
ماشین‌آلات Machinery	کیلوگرم kg	2.92	142.70	Kaltsas, Mamolos, Tsatsarelis, Nanos, & Kalburtji, 2007
سوخت فسیلی Fossil fuel	لیتر L	110.00	56.31	Ozkan *et al*., 2007
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	کیلوگرم kg	84.87	60.6	Unakitan, Hurma, & Yilmaz, 2010
کود فسفر Phosphorus fertilizer	کیلوگرم kg	42.07	11.1	Alcaoz, Ozcatalbas, & Kizilay, 2009
کود گوگرد Sulfur fertilizer	کیلوگرم kg	24.42	1.12	Esengun, Erdal, Gunduz, & Erdal, 2007
علف‌کش Herbicide	لیتر L	1.30	287	Rathke & Diepenbrock, 2006
حشره‌کش Insecticide	لیتر L	1.00	237	Rathke & Diepenbrock, 2006
قارچ‌کش Fungicide	لیتر L	1.25	99	Strapatsa, Nanos, & Tsatsarelis, 2006
بذر Seed	کیلوگرم kg	6.80	29.2	Rowsell, Jobler, Earl, Coyle, & Hawkins, 2007
عملکرد دانه Canola yield	کیلوگرم kg	2238.6	28.3	Rathke & Diepenbrock, 2006

ورودی انرژی کل نیز برای هر مزرعه با جمع مقادیر معادل انرژی تمام ورودی‌ها در آن مزرعه محاسبه شد. همچنین، ورودی انرژی و خروجی انرژی برای نظام زراعی کلزا، با میانگین‌گیری از کل ۵۰ مزرعه کلزا محاسبه شد. در این پژوهش، مهم‌ترین شاخص‌های

انرژی شامل کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی، انرژی ویژه، انرژی خالص، انرژی ورودی کل و انرژی خروجی کل برای ارزیابی کارایی نظام زراعی (رابطه‌های (۲) تا (۵)) (Asgharipour *et al*., 2016; Alimagham *et al*., 2017)، در نظام زراعی کلزا، محاسبه شدند.

$$\text{Energy use efficiency} = \frac{\text{energy output (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{energy input (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (۲)$$

$$\text{Energy productivity} = \frac{\text{yield output (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{energy input (MJ ha}^{-1}\text{)}} \quad (۳)$$

$$\text{Specific energy} = \frac{\text{energy input (MJ ha}^{-1}\text{)}}{\text{yield output (kg ha}^{-1}\text{)}} \quad (۴)$$

$$\text{Net energy} = \text{energy output (MJ ha}^{-1}\text{)} - \text{energy input(MJ ha}^{-1}\text{)} \quad (۵)$$

ارزیابی ردپای کربن

ردپای بوم‌شناختی به‌عنوان مقدار زمین مورد نیاز برای جذب آلودگی‌های زیست‌محیطی ایجاد شده توسط مصرف نهاده‌ها و منابع بر حسب هکتار جهانی در یک سال زراعی در نظام زراعی کلزا تعیین می‌شود. مبنای ارزیابی ردپای کربن و در نتیجه پایداری در این تحقیق، جذب کربن در نظام زراعی کلزا بود. معیار جذب کربن در نظام‌های زراعی معیار دقیق‌تری در ارزیابی ردپای کربن و پایداری است (Guzman, Marrero, & Arellano, 2013). هر هکتار زمین توانایی جذب ۱/۸ تن کربن را داشته و در شرایطی که ردپای کربن در یک نظام زراعی بیش از این مقدار باشد، از لحاظ محیطی ناپایدار خواهد بود (Naderi Mahdei *et al*., 2015). برای ارزیابی ردپای کربن بر حسب کربن و در نتیجه پایداری محیطی در این پژوهش، از مدل ردپای کربن بر مبنای مصرف انرژی و با رویکرد مکان محور استفاده شد (روابط (۶) تا (۸)) (Kissinger & Gottlieb, 2012; Guzman *et al*., 2013).

$$EFt = \sum_{i=1}^{n} EFi = \left(\frac{Ei \times T}{C_0}\right) \quad (۶)$$

$$Ei = Fi \times EQF \times 1000 \quad (۷)$$

$$T = \left(\frac{Pc}{Ec \times Oc \times K}\right) \quad (۸)$$

در این مدل، EF_t، شاخص ردپای بوم‌شناختی بر حسب هکتار جهانی، E_C، توانایی تولید انرژی توسط هر گرم زغال‌سنگ (۲۰ کیلوژول)، E_i، انرژی عامل i بر حسب کیلوژول، C_0، توانایی یک هکتار زمین برای جذب کربن بر حسب تن (۱/۸ تن)، F_i، انرژی عامل i ام، EQF عامل معادل‌ساز عامل i ام برای تبدیل زمین مولد به هکتار جهانی، P_c، درصد کربن موجود در زغال‌سنگ (۰/۸۵ درصد) بر حسب گرم، O_c، درصد زغال‌سنگ بازدهی شده به‌وسیله گیاهان معادل (۰/۳۱۴ درصد) بر حسب گرم و K، ضریب ثابت برای تبدیل گرم به تن (۱۰۰۰۰۰۰) است (Rezaei *et al*., 2019).

ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی

مقدار گازهای گلخانه‌ای تولیدشده از طریق ضرب مقادیر خام ورودی‌های مصرف شده در ضریب انتشار مربوط به آن‌ها محاسبه شد (Asgharipour *et al*., 2016) (جدول ۲).

جدول ۲- ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای (گرم) برای ورودی‌های شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی آن‌ها
Table 2- Emission coefficient of greenhouse gases (g) for chemical inputs and their global warming potential

ورودی Input	دی‌اکسید کربن CO_2	اکسید نیتروس N_2O	متان CH_4	منبع Reference
سوخت فسیلی Fossil fuel	3560	0.70	5.20	Kramer, Moll, & Nonhebel, 1999
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	3100	0.03	3.70	Snyder, Bruulsema, Jensen, & Fixen, 2009
کود فسفر Phosphorus fertilizer	1000	0.02	1.80	Snyder *et al*., 2009
کود گوگرد Sulphur fertilizer	700	0.01	1	Bhatarai, Abagandura, Nleya, & Kumar, 2021
علف‌کش Herbicide	5100	0.02	0.01	Asgharipour *et al*., 2016
حشره‌کش Insecticide	5100	0.02	0.01	Asgharipour *et al*., 2016
قارچ‌کش Fungicide	5100	0.02	0.01	Asgharipour *et al*., 2016
عامل معادل دی‌اکسید کربن پتانسیل گرمایش جهانی GWP CO_2e factor	1	310	21	Asgharipour *et al*., 2016

مقدار گازهای گلخانه‌ای منتشرشده را می‌توان بر حسب هر واحد زمین مورد استفاده در تولید محصول، هر واحد وزن محصول و هر واحد از ورودی یا خروجی انرژی محاسبه کرد (Soltani *et al.*, 2013). در این تحقیق میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروس و متان بر حسب کیلوگرم در هکتار در رابطه با ورودی‌های سوخت فسیلی، کودهای نیتروژن، فسفر و گوگرد و سموم شیمیایی بر حسب کیلوگرم در هکتار برای تولید کلزا کمی شد و سپس پتانسیل گرمایش جهانی هر گاز گلخانه‌ای برای این نظام زراعی به روش زیلیواکیس (Tzilivakis, Warner, May, Lewis, & Jaggard, 2005) محاسبه شد. پتانسیل گرمایش جهانی، تعیین‌کننده سهم نسبی یک گاز از اثر گلخانه‌ای و به‌عنوان اثرات نیروی تابشی تجمعی بین زمان حاضر و زمان انتخابی در آینده است که از طریق یک جرم واحد گاز منتشرشده در زمان حال ایجاد شده است. انتشارها بر اساس معادل دی‌اکسید کربن، به‌عنوان گاز مرجع، اندازه‌گیری می‌شوند (Yousefi, Mahdavi Damghani, & Khoramivafa, 2014b). پتانسیل گرمایش جهانی متان و اکسید نیتروس در دوره زمانی بیش از صد سال نیز به‌ترتیب حدود ۲۱ و ۳۱۰ در نظر گرفته شد (Asgharipour *et al.*, 2016). در انتها، میزان اثر گلخانه‌ای توسط رابطه (۹) تعیین گردید (Kramer *et al.*, 1999).

$$\text{Greenhouse effect} = \sum GWPi \times Mi\ (kg) \qquad (۹)$$

در این رابطه، GWP پتانسیل گرمایش جهانی و Mi جرم گاز انتشاریافته است.

کارایی مصرف کربن نیز توسط رابطه (۱۰) محاسبه شد (Yousefi, Khoramivafa, & Mondani, 2014a).

$$\text{Carbon efficiency ratio} = \frac{\text{yield output (kgC ha}^{-1})}{\text{GWP (kgC ha}^{-1})} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه، عملکرد محصول باید بر اساس معادل کربن بیان شود. محتوای کربن را معمولاً ۴۵ درصد از عملکرد کل در نظر می‌گیرند (Bolinder, Janzen, Gregorich, Angers, & Vanden Bygaart, 2007). همچنین به این دلیل که پتانسیل گرمایش جهانی بر اساس معادل دی‌اکسید کربن است، برای تعیین محتوای کربن باید این مقدار را در نسبت وزن مولکولی کربن به دی‌اکسید کربن ضرب کرد که معمولاً ۱۲/۴۴ یا حدود ۰/۲۷ می‌باشد (Yousefi *et al.*, 2014a). در نهایت، شاخص پایداری برای ارزیابی جریان انرژی، ذخیره کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای (Yousefi *et al.*, 2014b) در نظام زراعی کلزا توسط رابطه (۱۱) محاسبه شد (Lal, 2004).

$$Is = \frac{[\text{Co (CO2eq ha}^{-1}) - \text{Ci (CO2eq ha}^{-1})]}{\text{Ci (CO2eq ha}^{-1})} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه، Co و Ci به‌ترتیب معادل کربن خروجی و معادل کربن ورودی‌های شیمیایی بر حسب معادل کربن در هکتار است.

برای تعیین محتوای کربن ورودی‌های شیمیایی نیز باید محتوای دی‌اکسید کربن آن‌ها را در نسبت وزن مولکولی کربن به دی‌اکسید کربن ضرب کرد (Yousefi *et al.*, 2014b). تمام محاسبات مربوط به تعیین میزان انرژی، ردپای بوم‌شناختی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و شاخص‌های آن‌ها، توسط نرم‌افزار EXCEL 2007 انجام شد. همچنین قابلیت اعتماد پرسشنامه محاسبه شد که ۰/۸۱ بود.

نتایج و بحث

ارزیابی انرژی

مقدار انرژی‌های ورودی و ردپای آن در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله در جدول ۳ نشان داده شده است.

انرژی ورودی کل یا همان انرژی حمایت‌کننده نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۱۳۲۰۰ مگاژول در هکتار بود (جدول ۴) که کمتر از مقدار ۱۷۷۸۶/۳۶ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۱۴۵۵۳/۱۹ مگاژول در هکتار (Kazemi *et al.*, 2016) برای تولید کلزا در استان گلستان بود که نشان‌دهنده مصرف کمتر انرژی برای تولید کلزا در شهرستان کلاله در مقایسه با این دو مورد است.

عملکرد دانه کلزا در شهرستان کلاله، ۲۲۳۸/۶ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. بر این اساس، انرژی خروجی کل که نشان‌دهنده انرژی معادل برای عملکرد دانه کلزا می‌باشد، ۶۳۴۰۰ مگاژول در هکتار بود (جدول ۴). این مقدار، بیشتر از مقدار ۵۳۷۹۸/۴۶ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۵۰۰۹۱/۰۰ مگاژول در هکتار (Kazemi *et al.*, 2016) برای نظام‌های زراعی کلزا در استان گلستان بود که نشان‌دهنده عملکرد بیشتر کلزا در شهرستان کلاله در مقایسه با مطالعات ذکرشده است. کارایی مصرف انرژی در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۴/۸ بود (جدول ۴). مقدار این شاخص برای نظام‌های زراعی کلزا در استان گلستان در دو مطالعه مجزا به‌ترتیب ۳/۰۲ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۳/۴۴ (Kazemi *et al.*, 2016) بود. بنابراین کارامدی نظام زراعی کلزا در تبدیل انرژی‌های ورودی به انرژی موجود در عملکرد دانه در شهرستان کلاله بیشتر از این دو نظام زراعی است. مقدار شاخص بهره‌وری انرژی، ۰/۱۷ کیلوگرم در مگاژول بود (جدول ۴). به عبارت دیگر، به ازای هر واحد انرژی ورودی، ۰/۱۷ کیلوگرم دانه، به‌عنوان خروجی نظام زراعی، تولید شده است. شاخص معکوس برای بهره‌وری انرژی، شاخص انرژی ویژه است که مقدار آن ۵/۹۰ مگاژول در کیلوگرم به‌دست آمد (جدول ۴).

جدول ۳- مقادیر انرژی (مگاژول در هکتار) و ردپای کربن (هکتار جهانی) ورودی‌ها در بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله
Table 3- Energy values (Mj ha^{-1}) of inputs and their carbon footprint (gha) in canola farming ecosystem in Kalaleh county

ورودی Input	مقدار انرژی Enrgy value	ردپا Foot print	درصد از ردپای کل Contribution of total foot print (%)
نیروی کارگری Human labor	29.4	0.002	0.2
ماشین‌آلات Machinery	416	0.03	3
سوخت فسیلی Fossil fuel	6190	0.46	46.46
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	5140	0.39	39.24
کود فسفر Phosphorus fertilizer	467	0.04	4
کود گوگرد Sulphur fertilizer	27.4	0.002	0.2
علف‌کش Herbicide	373	0.03	3
حشره‌کش Insecticide	237	0.02	2
قارچ‌کش Fungicide	123	0.009	0.9
بذر Seed	198	0.01	1
کل Total	13200	0.99	100.00

جدول ٤- شاخص‌های انرژی در بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله
Table 4- Energy indices in canola farming ecosystem in Kalaleh county

شاخص Index	واحد Unit	مقدار Value
کارایی مصرف انرژی Energy use efficiency	-	4.8
بهره‌وری انرژی Energy productivity	کیلوگرم در مگاژول kg MJ^{-1}	0.17
انرژی ویژه Specific energy	مگاژول در کیلوگرم MJ kg^{-1}	5.90
انرژی خالص Net energy	مگاژول در هکتار MJ ha^{-1}	50200
انرژی ورودی کل Total energy input	مگاژول در هکتار MJ ha^{-1}	13200
انرژی خروجی کل Total energy output	مگاژول در هکتار MJ ha^{-1}	63400

یعنی مصرف انرژی به ازای هر واحد دانه کلزای تولیدی، ۵/۹۰ مگاژول است. مقدار شاخص‌های بهره‌وری انرژی به‌ترتیب ۰/۱۲ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۰/۱۲ کیلوگرم در مگاژول (Kazemi *et al.*, 2016) و انرژی ویژه به‌ترتیب ۸/۲۷ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۸/۲۶ مگاژول در کیلوگرم (Kazemi *et al.*, 2016) برای تولید کلزا در استان گلستان بود. شاخص انرژی خالص برای نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۵۰۲۰۰ مگاژول در هکتار محاسبه شد (جدول ۴). این مقدار بیشتر از مقدار ۳۶۰۱۲/۰۹ (Mousavi-Avval *et al.*, 2011) و ۳۵۵۳۷/۸۱ مگاژول در هکتار (Kazemi *et al.*, 2016) برای تولید کلزا در استان گلستان بود که نشان‌دهنده اتلاف کمتر انرژی و پایداری بیشتر تولید کلزا در شهرستان کلاله در مقایسه با موارد مذکور است.

ارزیابی ردپای کربن

ردپای کربن تولید کلزا در شهرستان کلاله، با توجه به میزان کل انرژی مصرفی محاسبه شده، معادل ۰/۹۹ هکتار جهانی به‌دست آمد (جدول ۳). این مقدار بسیار کمتر از ظرفیت بوم‌شناختی هر هکتار زمین مورد استفاده برای تولید کلزا است؛ زیرا توانایی هر هکتار زمین، برای جذب کربن، ۱/۸ تن می‌باشد (Rezaei *et al*., 2019). بنابراین تولید کلزا در شهرستان کلاله، از نظر زیست‌محیطی، پایدار می‌باشد. در پژوهشی میزان ردپای بوم‌شناختی تولید سیب‌زمینی و خیار در شهرستان بهار به‌ترتیب ۴/۰۳ و ۳/۲۳ هکتار جهانی محاسبه شده است (Rezaei *et al*., 2019). ورودی سوخت فسیلی، بیشترین تاثیر بر ردپای بوم‌شناختی تولید کلزا در شهرستان کلاله را داشت (۴۶/۴۶ درصد) (جدول ۳) که علت اصلی آن، دفعات بالای خاک‌ورزی و فرسوده بودن ماشین‌آلات در اغلب مزارع مورد بررسی بود. کاهش دفعات ورود ماشین‌آلات به مزرعه، از طریق کاربرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، از یک طرف و نوسازی ماشین‌آلات از طرف دیگر، در کاهش مصرف این ورودی موثر است. با توجه به تجدیدناپذیر بودن این ورودی، کاهش مصرف آن علاوه بر کاهش هزینه‌های اقتصادی، در کاهش آلودگی محیط نیز موثر است. کود نیتروژن، دومین سهم از ردپای کل در نظام زراعی کلزا را داشت (۳۹/۲۴ درصد). این مقدار، بسیار بیشتر از سهم کودهای فسفر (۴ درصد) و گوگرد (۰/۲ درصد) از ردپای کل در این نظام زراعی بود. مصرف کود دامی (گاوی) تا حد امکان و اجرای تناوب‌های زراعی مناسب با لگوم‌هایی مانند سویا که قابلیت رشد مناسب در این منطقه را دارند، در تامین نیتروژن خاک و در نتیجه کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی موثر است. بر این اساس، دو ورودی سوخت فسیلی و کود نیتروژن، ۸۵/۷۰ درصد از ردپای کربن تولید کلزا را موجب شدند. بنابراین، مدیریت و کاهش مصرف این دو ورودی، در کاهش ردپای کربن تولید کلزا و افزایش پایداری محیطی تولید این محصول در شهرستان کلاله موثر خواهد بود.

انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی

مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروس و متان برای ورودی‌های سوخت فسیلی، کود نیتروژن، کود فسفر، کود گوگرد و سموم شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی آن‌ها در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- انتشار گازهای گلخانه‌ای (کیلوگرم در هکتار) از ورودی‌های شیمیایی و پتانسیل گرمایش جهانی آن‌ها در بوم‌نظام زراعی کلزا

Table 5- Emission of greenhouse gases (kg ha^{-1}) from chemical inputs and their global warming potential in canola farming ecosystem

ورودی Input	دی‌اکسید کربن CO_2	اکسید نیتروس N_2O	متان CH_4	پتانسیل گرمایش جهانی GWP	درصد از کل پتانسیل گرمایش جهانی Contribution of GWP (%)
سوخت فسیلی Fossil fuel	391.6	0.08	0.57	428.37	54.83
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer	263.1	0.003	0.31	270.54	34.73
کود فسفر Phosphorus fertilizer	42.07	0.0008	0.16	45.68	5.86
کود گوگرد Sulphur fertilizer	17.09	0.0002	0.02	17.57	2.26
علف‌کش Herbicide	6.63	0.00003	0.00001	6.64	0.85
حشره‌کش Insecticide	5.10	0.00002	0.00001	5.10	0.65
قارچ‌کش Fungicide	6.38	0.00002	0.00001	6.39	0.82
انتشار کل Total emission	731.97	0.08	1.06	-	-
عامل معادل دی‌اکسید کربن پتانسیل گرمایش جهانی GWP CO_2e factor	731.97	24.8	22.26	-	-

مقدار انتشار دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروس و متان از نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله به‌ترتیب ۷۳۱/۹۷، ۰/۰۸ و ۱/۰۶ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۵) که به‌ترتیب کمتر از مقادیر ۲۶۶۸/۳۵، ۲۲/۹۲ و ۳/۴۹ کیلوگرم در هکتار در نظام تولید چغندرقند در استان کرمانشاه (Yousefi *et al.*, 2014a) بود. همچنین، پتانسیل گرمایش جهانی برای نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۷۷۹/۰۳ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن در هکتار به‌دست آمد. به‌عبارت دیگر، هر کیلوگرم تولید کلزا در شهرستان کلاله موجب تولید ۰/۳۵ کیلوگرم معادل دی‌اکسید کربن، گرمایش می‌شود. مقدار پتانسیل گرمایش جهانی به‌دست آمده در این تحقیق، بسیار کمتر از مقادیر ۱۱۱۰۰/۴۳، ۷۹۳۴/۱۸ و ۸۷۸۷/۲۸، به‌ترتیب برای تولید گندم به روش آبیاری جوی و پشته، بارانی و قطره‌ای در شهرستان مرودشت، ۱۰۶۶۳/۷۴، ۸۱۶۵/۱۴ و ۹۱۰۴/۱۲، به‌ترتیب برای تولید گندم به روش آبیاری جوی و پشته، بارانی و قطره‌ای در استان لرستان (Jamali *et al.*, 2021) و ۳۹۱۳/۹۴ و ۱۸۵۷/۱۵ به‌ترتیب برای تولید پاییزه و بهاره سیب‌زمینی در استان گلستان (Shahhoseini, Ramroudi, & Kazemi, 2021) بود که نشان‌دهنده اثر گلخانه‌ای و گرمایش جهانی بسیار کمتر تولید کلزا در شهرستان کلاله در مقایسه با مطالعات ذکر شده است. بر این اساس، تولید کلزا در شهرستان کلاله از پایداری محیطی قابل‌قبولی برخوردار است.

در این تحقیق سوخت فسیلی، سهم بسیار بیشتری از پتانسیل گرمایش جهانی، نسبت به سایر ورودی‌های شیمیایی به نظام زراعی کلزا را داشت (۵۴/۸۳ درصد) (جدول ۵) که به دلیل دفعات زیاد کاربرد ماشین‌آلات و فرسوده بودن آن‌ها در اغلب مزارع مورد بررسی بود. کاربرد ماشین‌آلات مرکب (کمبینات) در کاهش دفعات ورود ماشین‌آلات به مزرعه و کاهش مصرف این ورودی شیمیایی موثر است. همچنین، حذف یارانه سوخت، با هدف ترغیب کشاورزان به مصرف کارامدتر آن و جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر توصیه می‌شود. برای دست‌یابی به مصرف صحیح منابع انرژی، از جمله سوخت فسیلی و کاهش آسیب‌های محیطی، باید هر دو عامل سیاست‌گذاری و اجرای کشاورزی، الگوهای مدیریتی کارامد برای رسیدن به پایداری محیطی را تدوین و اجرا کنند (Yousefi *et al.*, 2014b). کود شیمیایی نیتروژن، دومین سهم از پتانسیل گرمایش جهانی در نظام زراعی کلزا را داشت (۳۴/۷۳ درصد) که بسیار بیشتر از سایر کودهای مصرفی بود. این امر به دلیل مصرف فشرده کود نیتروژن در این نظام زراعی بود. ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظام زراعی کلزا در استان گلستان نشان داد، بیشترین سهم از پتانسیل گرمایش جهانی، مربوط به کود نیتروژن (۴۴/۱۵ درصد) بود (Kazemi *et al.*, 2016). مصرف کود در مناسب‌ترین زمان و توزیع آن با روش مناسب در کنار اصلاح ساختمان خاک (مدیریت خاک‌ورزی) در کاهش مصرف کود نیتروژن و در نتیجه کاهش آلودگی‌های محیطی در کنار منفعت اقتصادی، موثر است؛ زیرا کاهش ورودی‌های شیمیایی علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد پایداری، در افزایش کارایی اقتصادی نیز نقش دارد (Yousefi *et al.*, 2014b). در این خصوص، آموزش و توجیه کشاورزان اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نظام‌های تولید با ورودی‌های پایین انرژی، به‌خوبی توسط کشاورزان که علاقه بیشتری به منفعت اقتصادی، نسبت به بهره‌وری دارند، پذیرفته نشده است. سهم سموم شیمیایی از پتانسیل گرمایش جهانی در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۲/۳۲ درصد بود که کمتر از مقدار ۳/۶۵ برای تولید این محصول در کل استان گلستان (Kazemi *et al.*, 2016) و بسیار بیشتر از مقادیر ۰/۱ برای تولید یونجه در منطقه سیستان (Asgharipour *et al.*, 2016) و ۰/۲۸ و ۰/۱۲ درصد، به‌ترتیب برای تولید سیب‌زمینی پاییزه و بهاره در استان گلستان (Shahhoseini *et al.*, 2021) بود. مدیریت دقیق مزرعه، به منظور کاهش ورود بذور علف‌های هرز، در کنار روش‌های کنترل غیرشیمیایی مانند کنترل مکانیکی و زیستی در کاهش مصرف این ورودی شیمیایی، با اثرات مخرب زیاد محیطی، موثر است. محتوای کربن دانه برداشت شده و ورودی‌های شیمیایی محاسبه شده در پتانسیل گرمایش جهانی در نظام تولید کلزا در شهرستان کلاله به‌ترتیب ۱۰۰۷/۳۷ و ۲۱۰/۳۴ کیلوگرم کربن در هکتار بود (جدول ۶).

بر این اساس مقدار کربن خالص یا پتانسیل ترسیب کربن در نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله ۷۹۷/۰۳ کیلوگرم کربن در هکتار بود. با توجه به سهم بسیار زیاد دی‌اکسید کربن از کل گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی، ترسیب کربن راهکار مفیدی برای کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری است (Khorramdel, Koocheki, Nassiri Mahallati, Khorasani, & Ghorbani, 2013). مقدار این شاخص برای تولید ذرت در استان کرمانشاه ۷۱۸۷/۷۵ کیلوگرم کربن در هکتار بود (Yousefi *et al.*, 2014b). کارایی مصرف کربن و شاخص پایداری برای نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله به‌ترتیب ۴/۷۹ و ۳/۷۹ بود که نشان‌دهنده پایداری محیطی مناسب نظام زراعی کلزا در این شهرستان است. مقدار کارایی کربن برای نظام‌های تولید زعفران در استان خراسان جنوبی ۰/۱۸ محاسبه شده است (Khorramdel, Nassiri Mahallati, Soltan Ahmadi, Hooshmand, & Mostafavi, 2021). ارزیابی اثر گلخانه‌ای تولید سیب‌زمینی پاییزه و بهاره در استان گلستان نشان داد، به‌ترتیب مقدار کارایی مصرف کربن ۱۳/۴۶ و ۱۷/۳۲ و شاخص پایداری ۱۲/۴۶ و ۱۶/۳۲ بود (Shahhoseini *et al.*, 2021).

جدول ٦- شاخص‌های اثر گلخانه‌ای (ردپای کربن) بوم‌نظام زراعی کلزا در شهرستان کلاله
Table 6- Indices of greenhouse effect of canola farming ecosystem in Kalaleh county

شاخص Index	واحد Unit	مقدار Value
کربن خروجی Carbon output	کیلوگرم کربن در هکتار kg C ha^{-1}	1007.37
کربن ورودی Carbon input	کیلوگرم کربن در هکتار kg C ha^{-1}	210.34
کربن خالص Net carbon	کیلوگرم کربن در هکتار kg C ha^{-1}	797.03
کارایی کربن Carbon efficiency	-	4.79
شاخص پایداری Sustainability index	-	3.79

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شاخص‌های انرژی، ردپای کربن ، اثر گلخانه‌ای، پتانسیل گرمایش جهانی و در نتیجه پایداری تولید کلزا در شهرستان کلاله برای نخستین بار ارزیابی شد. تحلیل شاخص‌های انرژی از جمله کارایی مصرف انرژی و انرژی خالص نشان داد، اتلاف انرژی در نظام زراعی کلزا کم و این نظام از پایداری قابل‌قبولی برخوردار است. ارزیابی ردپای کربن نشان داد، مقدار این شاخص برای تولید کلزا در شهرستان کلاله کمتر از ظرفیت بوم‌شناختی هر هکتار زمین مورد استفاده برای تولید کلزا بود که نشان‌دهنده پایداری محیطی تولید این محصول در شهرستان کلاله است. با این وجود، سهم سوخت فسیلی و کود نیتروژن از ردپای کربن تولید کلزا بسیار بیشتر از سایر ورودی‌ها به این نظام زراعی بود. با توجه به دفعات زیاد خاک‌ورزی و عمر بالا و فرسوده‌بودن ماشین‌آلات در اغلب مزارع مورد مطالعه، اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و نوسازی ماشین‌آلات در کاهش مصرف سوخت موثر خواهد بود. همچنین مصرف کود نیتروژن به مقدار مناسب و در بهترین زمان و کاربرد کود دامی به جای آن (تا حد امکان)، در کاهش مصرف نیتروژن و بهبود الگوی مصرف انرژی در این نظام زراعی موثر است. ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل گرمایش جهانی تولید کلزا نشان داد، بیشترین سهم از پتانسیل گرمایش جهانی نیز به‌ترتیب مربوط به ورودی سوخت فسیلی و کود نیتروژن بود. اجرای راهکارهای توصیه شده برای کاهش مصرف این ورودی‌ها از جمله مدیریت دقیق، در کاهش مصرف آن‌ها و در نتیجه کاهش پتانسیل گرمایش جهانی در این نظام زراعی موثر است. با این وجود، بر اساس ارزیابی شاخص‌های مربوط به اثر گلخانه‌ای، تولید کلزا در شهرستان کلاله از لحاظ محیطی، پایدار است. به‌عنوان نتیجه نهایی، تولید کلزا در شهرستان کلاله از لحاظ هر سه جنبه تحلیل انرژی، ردپای کربن و اثر گلخانه‌ای، پایدار است. همچنین، اجرای راهکارهای مدیریتی توصیه‌شده، مانند اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و مصرف کود دامی، در کاهش مصرف ورودی‌های سوخت فسیلی و کود نیتروژن، به‌عنوان ورودی‌های با بیشترین تاثیر بر تولید کلزا در این شهرستان، در بهبود شاخص‌های مورد ارزیابی و افزایش پایداری موثر است.

References

1. Alcaoz, H., Ozcatalbas, O., & Kizilay, H. (2009). Analysis of energy use for pomegranate production in Turkey. *Journal of Food Agriculture and Environment*, *7*, 475-80.
2. Alimagham, S. M., Soltani, A., Zeinali, E., & Kazemi, H. (2017). Energy flow analysis and estimation of greenhouse gases (GHG) emissions in different scenarios of soybean production (Case study: Gorgan region, Iran). *Journal of Cleaner Production*, *149*, 621-628. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.118
3. Asgharipour, M. R., Mousavinik, S. M., & Fartout Enayat, F. (2016). Evaluation of energy input and greenhouse gases emissions from alfalfa production in the Sistan region, Iran. Energy Reports 2: 135-140. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.05.007
4. Bhatarai, D., Abagandura, G. O., Nleya, T., & Kumar, S. (2021). Responses of soil surface greenhouse gas emissions to nitrogen and sulfur fertilizer rates to *Brassica carinata* grown as a bio-jet fuel. *GCB-Bioenergy*, *13*(4), 627-639. https://doi.org/10.1111/gcbb.12784
5. Bolinder, M. A., Janzen, H. H., Gregorich, E. G., Angers, D. A., & Vanden Bygaart, A. J. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada.

Agriculture, Ecosystems and Environment, *118*, 29-42. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013
6. Cerutti, A., Beccaro, G. L., Bagliani, M., Donno, D., & Bounous, G. (2013). Multifunctional Ecological Footprint Analysis for Assessing Eco-efficiency: A Case Study of Fruit Production Systems in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production, 40*, 108-117. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.028
7. Cochran, J. (2003). *Patterns of sustainable agriculture adoption/non-adoption in Panama a thesis submitted to McGill University*. McGill University, Montreal, Canad: 1-114.
8. Elsoragaby, S., Yahya, A., Mahadi, M. R., Mat Nawi, N., & Mairghany, M. (2019). Energy utilization in major crop cultivation. *Energy, 173*, 1285-1303. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.142
9. Esengun, K., Erdal, G., Gunduz, O., & Erdal, H. (2007). An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renewable Energy*, *32*, 1873-1881. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.07.005
10. Guzman, J., Marrero, M., & Arellano, A. (2013). Methodology for Determining the Ecological Footprint of the Construction of Residential Buildings in Andalusia (Spain). *Ecological Indicators*, *25*, 239-249. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.008
11. Hoffman, E., Cavigelli, M. A., Camargo, G., Ryan, M., Ackroyd, V. J., Richard, T. L., & Mirsky, S. (2018). Energy use and greenhouse gas emissions in organic and conventional grain crop production: Accounting for nutrient inflows. *Agricultural Systems, 162*, 89-96. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.021
12. Jamali, M., Soufizadeh, S., Yeganeh, B., & Emem, Y. (2021). A Comparative study of irrigation techniques for energy flow and greenhouse gas (GHG) emissions in wheat agroecosystems under contrasting environments in south of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *139*, 110704. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110704
13. Jankowski, K. J., Budzynski, W. S., & Kijewski, L. (2015). An analysis of energy efficiency in the production of oilseed crops of the family Brassicaceae in Poland. *Energy*, *81*, 674-681. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.012
14. Jihad-e-Agricultural Organization of Golestan Province. (2019). *Deputy for Plant Production Improvement. Management of agricultural affairs*. Vegetable and summer office.
15. Kaltsas, A. M., Mamolos, A. P., Tsatsarelis, C. A., Nanos, G. D., & Kalburtji, K. L. (2007). Energy budget in organic and conventional olive groves. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, *122*, 243-251. https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.017
16. Kaur, N., Kumar Vashist, K., & Brar, A. S. (2021). Energy and productivity analysis of maize based crop sequences compared to rice-wheat system under different moisture regimes. *Energy*, *216*, 119286. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119286
17. Kazemi, H., Hassanpour Bourkheili, S., Kamkar, B., Soltani, A., Gharanjic, K., & Nazari, N. M. (2016). Estimation of greenhouse gas (GHG) emission and energy use efficiency (EUE) analysis in rainfed canola production (case study: Golestan province, Iran). *Energy*, *116*, 694-700. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.010
18. Khorramdel, S., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Khorasani, R., & Ghorbani, R. (2013). Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil and Tillage Research*, *133*, 25-31. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.008
19. Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Soltan Ahmadi, A., Hooshmand, M., & Mostafavi, M. J. (2021). Evaluation of Carbon Footprint and N_2O Emission Indicators for Saffron Production Systems in Khorasan Provinces. *Saffron Agronomy & Technology*, *9*(3), 249-267. https://doi.org/10.22048/jsat.2021.255436.1413
20. Kissinger, M., & Gottlieb, D. (2012). From Global to place Oriented Hectares: The Case of Israel's Wheat Ecological Footprint and Its Implication for Sustainable Resource Supply. *Ecological Indicators*, *16*, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.012
21. Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2016). Climate Change Effects on Agricultural Production of Iran: II. Predicting Productivity of Field Crops and Adaptation Strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *14*(1), 1-20. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v14i1.51157
22. Kramer, K. J., Moll, H. C., & Nonhebel, S. (1999). Total greenhouse gas emissions related to the Dutch crop production system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *72*, 9-16. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00158-3
23. Kumar, A., Rana, K. S., Choudhary, A. K., Bana, R. S., Sharma, V. K., Prasad, S., Gupta, G., Choudhary, M., Pradhan, A., Rajpoot, S. K., Kumar, A., Kumar, A., & Tyagi, V. (2021). Energy budgeting and carbon footprints of zero-tilled pigeonpea-wheat cropping system under sole or dual crop basis residue mulching and Zn-fertilization in a semi-arid agro-ecology. *Energy*, *231*, 120862. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120862
24. Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment International*, *30*, 981-90. https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005
25. Lombardi, G. V., Parrini, S., Atzori, R., Stefani, G., Romano, D., Gastaldi, M., & Liu, G. (2021). Sustainable agriculture, food security and diet diversity. The case study of Tuscany, Italy. *Ecological Modelling*, *458*, 109702.

https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109702
26. Montoya, D., Gaba, S., de Mazancourt, C., Bretagnolle, V., & Loreau, M. (2020). Reconciling biodiversity conservation, food production and farmers' demand in agricultural landscapes. *Ecological Modelling*, *416*, 108889. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108889
27. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S., Jafari, A., & Mohammadi, A. (2011). Energy flow modeling and sensitivity analysis of inputs for canola production in Iran. *Journal of Cleaner Production*, *19*, 1464-1470. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.013
28. Naderi Mahdei, K., Bahrami, A., Aazami, M., & Sheklabadi, M. (2015). Assessment of Agricultural Farming Systems Sustainability in Hamedan Province Using Ecological Footprint Analysis (Case Study: Irrigated Wheat). *Journal of Agricultural Science and Technology*, *17*, 1409-1420.
29. Ozkan, B., Fert, C., & Karadeniz, C. F. (2007). Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production. *Energy*, *32*, 1500-1504. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.010
30. Prakash Meena, B., Biswas, A. K., Singh, M., Das, H., Chaudhary, R. S., Singh, A. B., Shirale, A. O., & Patra, A. K. (2021). Energy budgeting and carbon footprint in long-term integrated nutrient management modules in a cereal- legume (*Zea mays- Cicer arietinum*) cropping system. *Journal of Cleaner Production*, *314*, 127900. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127900
31. Rathke, G. W., & Diepenbrock, W. (2006). Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. *European Journal of Agronomy*, *24*, 35-44. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.04.003
32. Rezaei, P., Naderi Mahdei, K., Karimi, S., & Shanazi, K. (2019). Environmental Sustainability Assessment of Farming System Using Ecological Footprint Analysis (Case Study: Potato and Cucumber Cultivation in Sofalgaran district of Bahar County). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *29*(2), 53-66. (in Persian with English abstract).
33. Rowsell, J., Jobler, J., Earl, H., Coyle, I., & Hawkins, B. (2007). Whole canola as a fuel source. Ontario alternati.ve renewable fuels research and development fund final report (OMAFRA).
34. Shahhoseini, H. R., Ramroudi, M., & Kazemi, H. (2021). Economic Analysis and Evaluating the Sustainability of Potato Production Based on Greenhouse Gas Emissions (Case Study: Golestan Province). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *31*(3), 295-311. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22034/saps.2021.39789.2488
35. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *133*, 247-266. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021
36. Soltani, A., Rajabi, M. H., Zeinali, E., & Soltani, E. (2013). Energy inputs and greenhouse gases emissions in wheat production in Gorgan, Iran. *Energy*, *50*, 54-61. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.022
37. Strapatsa, A. V., Nanos, G. D., & Tsatsarelis, C. A. (2006). Energy flow for integrated apple production in Greece. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, *116*, 176-80. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.02.003
38. Tzilivakis, J., Warner, D. J., May, M., Lewis, K. A., & Jaggard, K. (2005). An assessment of the energy inputs and greenhouse gas emission in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) production in the UK. *Agricultural Systems*, *85*, 101-119. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.07.015
39. Unakitan, G., Hurma, H., & Yilmaz, F. (2010). An analysis of energy use efficiency of canola production in Turkey. *Energy*, *35*, 3623-7. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.005
40. Yousefi, M., Khoramivafa, M., & Mondani, F. (2014a). Integrated evaluation of energy use, greenhouse gas emissions and global warming potential for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) agroecosystems in Iran. *Atmospheric Environment*, *92*, 501-505. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.050
41. Yousefi, M., Mahdavi Damghani, A., & Khoramivafa, M. (2014b). Energy consumption, greenhouse gas emissions and assessment of sustainability index in corn agroecosystems of Iran. *Science of the Total Environment*, *493*, 330-335. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.004